

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19820100154017

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

时空编码磁共振成像的重建
及其在单回波脂水分离中的应用

Image reconstruction for spatiotemporally encoded MRI
and its application in single-echo water-fat separation

陈颖

指导教师姓名: 陈忠 教授

专 业 名 称: 无线电物理

论文提交日期: 2014 年 4 月

论文答辩时间: 2014 年 5 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

专用缩写词英汉对照表

MRI= magnetic resonance imaging	磁共振成像
NMR= nuclear magnetic resonance	核磁共振
CT= computed tomography	X 射线断层扫描
PET= positron emission tomography	正电子发射断层扫描
SPECT =single photo emission computed tomography	单光子发射断层扫描
DWI= diffusion weighted imaging	扩散加权成像
DTI=diffusion tensor imaging	扩散张量成像
SWI= susceptibility weighted imaging	磁化率加权成像
MT= magnetization transfer	磁化转移
SAR= specific absorption rate	特定吸收率
DCE=dynamic contrast enhancement	动态对比度增强
fMRI =functional magnetic resonance imaging	功能磁共振成像
BOLD =blood oxygen level dependent	血氧水平依赖
DFT =discrete Fourier transform	离散傅里叶变换
SEMs= spatial encoding magnetic fields	空间编码磁场
EPI =echo planner imaging	平面回波成像
PNS =peripheral nerve stimulation	周围神经刺激
ROI= region of interest	感兴趣的区域
SE-EPI=spin-echo echo planner imaging	自旋回波平面回波成像
GE-EPI=gradient-echo echo planner imaging	梯度回波平面回波成像
rFOV=reduced field-of-view	小视野
TR= repetition time	重复时间
TE=echo time	回波时间
SW=spectral width	谱宽
FATSAT= fat presaturation	脂肪预饱和
SPSP= spatial-spectral selective excitation	空间和频率选择性激励

STIR=short T_1 inversion recovery	短 T_1 反转恢复饱和法
FIFO=first-in-first-out	先编码先解码
FILO=first-in-last-out	先编码后解码
RASER= rapid acquisition by sequential excitation and refocusing	一种均匀 T_2 加权的单扫描时空编码模式
PSF=point spread function	点扩散函数
SVD=singular value decomposition	奇异值分解
SPEN=spatiotemporally encoded imaging	时空编码成像
2DRF=two-dimensional radiofrequency pulse	二维射频脉冲
NSA=effective number of signal averages	有效信号平均数
SNR=signal-to-noise ratio	信噪比
CNR=contrast-to-noise ratio	对比度噪声比
IDEAL=iterative decomposition of water and fat with echo asymmetric and least-squares estimation	一种脂水分离迭代算法
T_1 =longitudinal relaxation time	纵向弛豫时间
T_2 =transverse relaxation time	横向弛豫时间
CSI=chemical shift imaging	化学位移成像

作者姓名： 陈颖

论文题目： 时空编码磁共振成像的重建及其在单回波脂水分离中的应用

作者简介： 陈颖，女，1980 年 6 月出生，2010 年 9 月师从于厦门大学陈忠教授，于 年 月获得博士学位。

中 文 摘 要

时空编码成像法利用线性扫频脉冲对质子数密度的空间分布进行编码，在脉冲作用的过程中，通过一个线性梯度场在空间中形成一定的频率分布，让不同位置的核自旋按顺序依次共振形成翻转，并在梯度场和偏共振效应的作用下散相，在脉冲结束后沿梯度场的方向会形成一个关于位置坐标和偏共振频率的二次相位调制。然后再通过施加与编码梯度相反方向的解码梯度，让不同位置不同组分的核自旋的相位弥散依次得到重聚，形成具有空间和频谱选择性的时空编码信号。

时空编码信号具有许多传统傅里叶编码信号不具备的特点和优点，因此这一新的成像法能够实现许多特殊的功能。本论文主要针对其在单扫描超快速成像中对场不均匀性所引起的图像失真的抵抗性进行深入研究，并提出一种基于时空编码化学位移成像的单回波脂水分离算法。

本论文的另外一个讨论重点是单扫描时空编码成像的重建问题，虽然时空编码信号的空间选择性使我们可以在不对其进行重建的情况下得到成像物大致的轮廓，但是在通常的二次相位调制强度下，这一轮廓的空间分辨率是很低的，必须进行高分辨重建才能得到更多的成像物信息。论文中介绍了三种单扫描时空编码成像的高分辨重建法，分别是求解信号方程组法、去卷积法和部分傅里叶法，通过分析它们各自的点扩散函数和理想情况下的信噪比分布轮廓，对这三种方法的优缺点进行比较。

关键词： 非线性相位编码；时空编码；二次相位编码；平面回波成像；脂水分离

Image reconstruction for spatiotemporally encoded MRI and its application in single-echo water-fat separation

ABSTRACT

In spatiotemporally encoded (SPEN) MRI, the information of proton density distribution is encoded by a linear frequency swept pulse (chirp pulse). The chirp pulse is acting in conjunction with a linear gradient field and the spins with different off-resonance frequencies are sequentially excited and dephased, forming a quadratic phase modulation about the position and off-resonance frequency at the end of excitation. After that, another gradient field that is in opposite polarity with the encoding one is implemented to sequentially unravel and refocus the phase of the spins at different locations and of different species, producing SPEN signals with spatial and spectral selectivity.

Attributed to the special characteristics of SPEN signal with regard to the traditional Fourier encoded one, a lot of new applications can be achieved with this novel MRI scheme. The immunity of the SPEN signals to the artifacts induced by various off-resonance effects in ultrafast single-shot imaging is studied, including distortions of image geometry and signal intensity, as well as the half-FOV ghosts. A new high-resolution algorithm is proposed for single-echo water-fat separation, which is an application of SPEN chemical shift MRI.

Another focus of this thesis is to discuss the image reconstruction in single-shot SPEN MRI. The spatial selectivity of the SPEN signals enables us to obtain a rough profile of the object without reconstruction. However, with the commonly used quadratic modulation intensity, the definition of this profile cannot meet the requirements for anatomical diagnosis. Therefore high-resolution reconstruction is very important for SPEN MRI. Three reconstruction methods are introduced in this thesis, which are solving the signal equation set, deconvolution and partial Fourier

transform. By comparing the point spread functions and the ideal signal-to-noise ratio profiles of these methods, the advantages and disadvantages of each of them are discussed.

Keywords: nonlinear phase encoding; spatiotemporal encoding; quadratic phase encoding; echo planner imaging; water-fat separation

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

专用缩写词英汉对照表	I
中文摘要	III
英文摘要	IV
中文目录	VI
英文目录	X
第一章 绪论	1
1.1 磁共振成像简介	1
1.1.1 磁共振成像的基本原理	1
1.1.2 磁共振成像的优点	2
1.1.3 磁共振成像的缺点和可能存在的危害	3
1.1.4 磁共振成像在临床医学中的应用	3
1.1.5 磁共振成像的发展历史	4
1.2 非线性相位编码在磁共振成像中的应用	5
1.2.1 传统傅里叶编码成像的缺点	5
1.2.2 射频脉冲实现非线性相位编码	6
1.2.3 梯度场实现非线性相位编码	7
1.3 单扫描时空编码成像	8
1.3.1 单扫描 EPI 成像的意义	8
1.3.2 单扫描 EPI 成像中的相位误差	9
1.3.3 单扫描时空编码成像的优点	11
1.3.4 单扫描时空编码成像的重建	11
1.4 基于时空编码的化学位移成像和脂水分离技术	12
1.4.1 脂水分离在临床应用中的重要性	12
1.4.2 传统的压脂法及其缺点	13
1.4.3 Dixon 脂水分离法及其缺点	13
1.4.4 基于时空编码的化学位移成像	14

1.4.5 基于单一时空编码回波的高分辨脂水分离算法	14
参考文献	15
第二章 时空编码成像的基本原理	22
2.1 引言	22
2.2 chirp 脉冲的特点	22
2.3 chirp 脉冲的激励编码	24
2.4 chirp 脉冲的重聚编码	25
2.5 时空编码信号的特点	26
2.6 常用的时空编码模式	28
参考文献	31
第三章 单扫描时空编码成像的重建	32
3.1 引言	32
3.2 原理	32
3.2.1 点扩散函数、分辨率和信噪比的关系	32
3.2.2 传统傅里叶编码的点扩散函数	33
3.2.3 单扫描时空编码成像的混叠伪影	34
3.2.4 求解信号方程组法	36
3.2.5 去卷积法	40
3.2.6 部分傅里叶法	43
3.3 实验	45
3.3.1 脉冲序列	46
3.3.2 实验设备	46
3.3.3 chirp 脉冲的设计和校正	47
3.3.4 数据处理	48
3.3.5 实验结果	48
3.4 小结	51
参考文献	52
第四章 非均匀场下的单扫描时空编码成像	54

4.1	引言	54
4.2	单扫描时空编码成像对场干扰效应的免疫力	54
4.2.1	二次相位调制对场干扰的抑制	54
4.2.2	单扫描时空编码信号的高带宽	55
4.2.3	时空编码信号的空间选择性	55
4.2.4	小视野成像的作用	56
4.2.5	半 FOV 鬼影的抑制	56
4.3	实验	57
4.3.1	脉冲序列	57
4.3.2	实验设备	57
4.3.3	数据处理	57
4.3.4	实验结果	57
	参考文献	62
	第五章 基于时空编码的单回波脂水分离成像	63
5.1	引言	63
5.2	原理	63
5.2.1	基于时空编码的化学位移成像	63
5.2.2	名义 k 空间寻峰	65
5.2.3	第一次正则化求解联合信号方程组	66
5.2.4	第二次正则化求解联合信号方程组	67
5.3	实验	70
5.3.1	脉冲序列	70
5.3.2	实验设备	71
5.3.3	实验对象	71
5.3.4	实验参数	71
5.3.5	数据处理	72
5.3.6	实验结果	72
5.4	讨论	81
5.5	小结	83

参考文献	83
第六章 总结与展望	84
6.1 全文总结	84
6.2 未来工作展望	84
论文发表及获奖情况	86
致谢	88

Content

Acronym	I
Abstract in Chinese	III
Abstract in English	IV
Content in Chinese	VI
Content in English	X
Chapter 1 Preface	1
1.1 Introduction of MRI	1
1.1.1 Basic principle of MRI	1
1.1.2 Advantages of MRI scanning	2
1.1.3 Disadvantages of MRI scanning and its potential harm	3
1.1.4 Clinical application of MRI	3
1.1.5 History of MRI	4
1.2 Application of nonlinear phase encoding in MRI	5
1.2.1 Disadvantages of traditional Fourier encoded MRI	5
1.2.2 Nonlinear phase encoding from RF encoding	6
1.2.3 Nonlinear phase encoding from gradient fields	7
1.3 Single-shot spatiotemporally encoded MRI	8
1.3.1 Significance of single-shot EPI imaging	8
1.3.2 Phase errors in single-shot EPI imaging	9
1.3.3 Advantages of single-shot SPEN MRI	11
1.3.4 Image reconstruction of single-shot SPEN MRI	11
1.4 CSI and water-fat separation based on SPEN MRI	12
1.4.1 Clinical significance of water-fat separation	12
1.4.2 Disadvantages of traditional fat suppression methods	13
1.4.3 Disadvantages of Dixon water-fat separation method	13
1.4.4 SPEN-based CSI	14

1.4.5 Single-echo water-fat separation algorithm	14
References.....	15
Chapter 2 Basic principle of SPEN MRI.....	22
2.1 Introduction	22
2.2 Characteristics of chirp pulse.....	22
2.3 Excitation encoding with chirp pulse	24
2.4 Refocus encoding with chirp pulse	25
2.5 Characteristics of SPEN signal	26
2.6 Commonly used SPEN modes	28
References.....	31
Chapter 3 Image reconstruction for single-shot SPEN MRI.....	32
3.1 Introduction	32
3.2 Theory	32
3.2.1 Relationship between PSF, spatial resolution and SNR	32
3.2.2 PSF of traditional Fourier encoded MRI.....	33
3.2.3 Alias artifacts in single-shot SPEN MRI.....	34
3.2.4 Solving signal equation set.....	36
3.2.5 Deconvolution	40
3.2.6 Partial Fourier transform	43
3.3 Experiments	45
3.3.1 Pulse sequence.....	45
3.3.2 Equipments	46
3.3.3 Design and calibration of chirp pulse.....	47
3.3.4 Data processing	48
3.3.5 results	48
3.4 Summary	51
References.....	52
Chapter 4 Single-shot SPEN MRI under inhomogeneous field	54
4.1 Introduction	54

4.2 Immunity of single-shot SPEN MRI to field perturbations	54
4.2.1 Suppression of field perturbations by quadratic phase modulation	54
4.2.2 High bandwidth of single-shot SPEN signal.....	55
4.2.3 Spatial selectivity of SPEN signal.....	55
4.2.4 The role of reduced field-of-view	56
4.2.5 Suppression of half-FOV ghost.....	56
4.3 Experiments	57
4.3.1 Pulse sequence.....	57
4.3.2 Equipments.....	57
4.3.3 Data processing	57
4.3.4 Results	57
References.....	62
Chapter 5 Water-fat separation from a single SPEN echo	63
5.1 Introduction	63
5.2 Theory	63
5.2.1 SPEN-based CSI	63
5.2.2 Nominal k-space peaking	65
5.2.3 The first joint regularized linear least squares estimation.....	66
5.2.4 The second joint regularized linear least squares estimation	67
5.3 Experiments	70
5.3.1 Pulse sequence.....	70
5.3.2 Equipments.....	71
5.3.3 Experimental objects	71
5.3.4 Parameters	71
5.3.5 Data processing	72
5.3.6 Results	72
5.4 Discussion	81
5.5 Conclusion	83
References.....	83

第六章 Summary and outlook	84
6.1 Summary	84
6.2 Future work.....	84
Publications and awards	86
Appreciation	88

厦门大学博硕士论文摘要库

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库